doi:10.13866/j.azr.2020.01.01

基于 ITPCAS 再分析资料中国近地面风速时空变化特征[①]

张晓龙， 沈 冰， 黄领梅
（西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室，陕西 西安 710048）

摘 要：准确分析中国近地面风速时空变化规律对区域气候变化、蒸散发的估算、雾霾预报等研究具有重要意义。本文利用1979—2015年ITPCAS再分析资料的近地面风速(10 m)与中国110个气象站点的风速资料，分析该数据集在中国区域的适用性，并对2011—2012年风速数据进行修正，分析该区域近地面风速的时空变化特征。结果表明：① ITPCAS再分析数据集风速资料基本满足应用要求，但部分数据需修正。修正后的风速数据模拟精度得到较大提高，具有较好的应用前景，特别是在西北高寒、干旱地区；② 1979—2015年中国62.12%的区域风速为下降趋势，全国平均风速每10 a变化速率为 $-0.073\ m\cdot s^{-1}$，其中东南诸河流域每10 a变化速率最大($-0.202\ m\cdot s^{-1}$)；③ 除珠江流域外，其他各流域风速均呈下降趋势。中国各月平均风速呈单峰形，最大值出现在4月，最小值出现在12月；④ 年平均风速变化主要表现在3—6月下降速率最大，风速变化趋势在各个流域、各月份保持不变。

关键词：近地面风速；ITPCAS再分析资料；时空变化；适用性分析；中国

近百年来，全球经历了一次以气候变暖为主要标志的显著变化，这种变化对全球生态系统和各国的社会经济产生巨大影响[1]。由于气温升高，大气中水汽含量发生改变，并引起全球范围内大气中水循环过程的改变，全球极端高温事件、极端降水事件增多[2-5]。风速作为表征气候形成与变化的重要气象因素，与降水、蒸发、水汽对流、雾和霾等天气现象密切相关[6-14]，但是在气候变化研究中风速的变化研究相对较少[6]。因此，分析中国范围内近地面风速(10 m)变化和空间分布对气候变化、蒸散发的估算、雾霾预报等研究具有重要的现实意义。

近地面风速变化受到国内外众多学者的关注。Vautard 等[15]分析了1979—2008年北半球882个站点的近地面风速，结果表明该时期大部分区域风速下降了5%～15%。McVicar 等[16]研究发现，全球中低纬度大部分地区近地面风速呈减弱趋势，高纬度(大于70°)地区风速呈增大趋势。McVicar 等[17]分析了1975—2006年澳大利亚近地面风速，结果表明88.6%的气象站风速呈下降趋势。Pryor 等[18]分析表明，1973—2005年，美国大部分地区风速呈减弱趋势。Wan 等[19]结果表明，在1953—2009年，加拿大西部和南部风速呈下降趋势，中部呈上升趋势。Pirazzoli 等[20]分析了意大利17个站点风速资料，认为1951年至20世纪70年代中期大部分地区风速明显减弱，70年代中期以后风速呈增加趋势。近年来国内学者也逐渐关注中国区域风速变化。王遵娅等[5]研究发现，1951—2000年中国平均风速存在明显的下降趋势，风速减小原因主要是亚洲冬、夏季风减弱。史培军等[6]研究发现1961—2012年，东北、华北风速呈大幅减小趋势，华东、华中和西北地区呈中幅减小趋势，东南、青藏高原呈小幅减小趋势，西南地区呈微幅减小趋势。熊敏诠[7]分析了1980—2009年中国608个测站日平均风速，结果表明中国大部分地区风速呈减少趋势，但中部部分地区风速出现递增。Jiang 等[21]分析得到，1956—2004年中国平均风速和最大风速均呈下降趋势。赵佳莹等[22]分析了中国区域探空资料与再分析资料风速场，得出中国对流层高层和中层均存在长期减弱趋势的结论。任国玉等[23]指出，1969—2002年中国平均风速呈减少趋势，速率为0.020

---

① **收稿日期：**2019-03-13； **修订日期：**2019-08-21
基金项目：国家重点研发计划(2017YFC0403605)；国家自然科学基金(51509202，51679185)资助
作者简介：张晓龙(1988-)，男，博士生，研究方向生态水文学、干旱区水文. E-mail: zhangzhangyanhe@hotmail.com
通讯作者：沈冰. E-mail: shenbing@xuat.edu.cn

$m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$。荣艳淑等[24]指出,1957—2006年华北地区平均风速减少速率为0.017 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$。张志斌等[25]发现,1969—2000年西南地区风速呈下降趋势,2000年以后风速呈上升趋势。区域平均风速下降的主要原因可能是受大气环流因子及区域变暖的影响[7,25]。风速的减小不利于空气中污染物扩散,使得近年来中国中东部地区雾霾日数明显增多[10-13],中国沙尘暴天气减少[14,26],同时使到达地表的辐射量明显减少,直接或间接影响区域水循环过程[27]。

当前对中国风速时空变化特征的研究大多使用气象站点数据,但站点分布并不均匀,在西部寒区、旱区分布尤其稀少。使用这些站点进行空间插值分析带来极大的不确定性,特别是西部山区。再分析资料的出现解决了站点时空分布不均的问题,因此,本研究利用中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集(ITPCAS)中的风速数据,在该数据集适用性分析的基础上,利用GIS空间分析技术、Mann-Kendal等方法,揭示1979—2015年中国区域风速的时间变化特征与空间分布特征,为进一步分析该区域气候变化和蒸散发研究提供数据和理论支撑。

1 数据和方法

1.1 数据来源

再分析气象数据集使用中国科学院青藏高原研究所开发的ITPCAS再分析数据集(http://westdc.westgis.ac.cn/)。该数据集中的气象要素包括气温、降水、风速、比湿、大气压力、向下短波和向下长波辐射,时段为1979—2015年,水平空间分辨率为0.1°[28]。地面观测资料使用国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/)提供的中国地面气候日值数据集(V3.0)。为了明确ITPCAS再分析资料的风速数据集在中国地区的适用性,最终选取分布均匀的110个气象站进行统计和分析(图1)。本研究采用中国科学院资源环境科学数据中心对流域的划分方法,将中国流域水系分为九大流域,分别为松辽河流域、西北内陆河流域、海河流域、黄河流域、淮河流域、长江流域、西南诸河、东南诸河和珠江流域(图1)。国家边界数据由国家基础地理信息中心提供。

1.2 评估方法

本研究使用简单相关系数(R)、平均误差(ME)

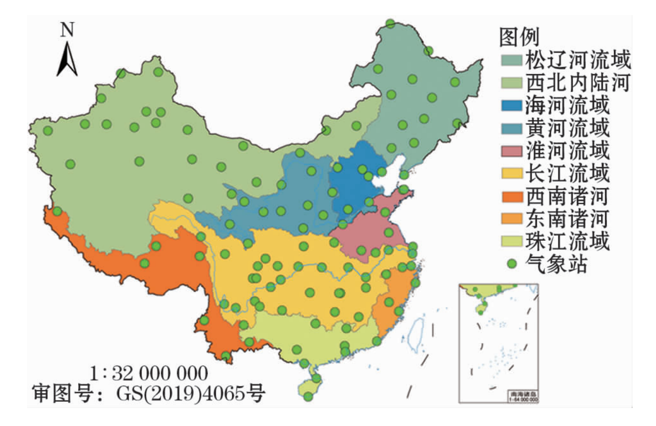


图1 气象站点分布与九大流域分布

Fig. 1 Spatial distributions of the meteorological stations and the 9 main drainage basins

和均方根误差(RMSE)来评估数据集,计算公式为:

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{1}$$

$$\mathrm{ME}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i) \tag{2}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-y_i)^2} \tag{3}$$

式中:x_i为第i个序列的再分析数据值;y_i为第i个序列的气象站观测值;$\bar{x}$和$\bar{y}$分别为x和y的平均值;n为序列长度。R表示ITPCAS再分析数据与气象站观测数据之间的线性相关程度,R的值介于[-1,1]区间。$R>0$表示正相关,$R<0$表示负相关。日尺度上R值大小表示风速年内逐日变化周期的一致性,月尺度上R值大小表示风速年内逐月变化周期的一致性,年尺度上R值大小表示风速年际变化周期和趋势的一致性。

ME表示ITPCAS再分析数据与气象站观测数据之间平均误差程度及误差方向,ME的绝对值越小,说明两者平均值越接近;ME>0,表示再分析数据比气象数据值大;反之则小。RMSE对ITPCAS再分析数据与气象站观测数据之间的特大值、特小值误差反应非常敏感,能较好的反映出再分析数据的精度,RMSE越小,说明两者对特大值、特小值越接近。

1.3 趋势分析

利用线性回归分析得到每个栅格值在时间序列上的变化趋势和强度。计算公式为:

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times x_i - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} x_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i \right)^2} \quad (4)$$

式中:x_i 为第 i 年的栅格值;$b>0$ 表示增加趋势,$b<0$ 表示减少趋势[8]。

1.4 突变分析和未来趋势分析

Mann-Kendall 法与传统参数方法相比,样本可不遵从特定分布规律,亦不受个别异常值干扰,可较客观地反映样本序列变化趋势,该方法被广泛应用于序列突变分析和检验趋势的显著性分析[29]。Kendall 倾斜率即 Sen 斜率估计法,其假设时间序列数据的趋势为线性,通过利用各数据点之间斜率的中位数作为整体的斜率估计值,并以该中值大小判断时间序列变化趋势及程度。

R/S 分析法是通过计算 Hurst 指数来判断序列的持续性或反持续性的统计方法[30]。Hurst 指数(H)存在 3 种形式:当 $0.5<H\leqslant 1$ 时,表明未来的变化将继承过去的总体趋势,变化具有持续性,H 越接近于 1,持续性越强;当 $H=0.5$ 时,表示时间序列完全独立,变化随机;当 $0\leqslant H<0.5$ 时,表明将来的总体趋势与过去相反,过程具有反持续性,H 越接近于 0,反持续性越强。

2 分析与讨论

2.1 再分析资料风速的适用性

再分析资料依赖于积累的观测数据和使用的资料同化模型以及某些具体细节参数的设定,所以,再分析资料难免存在一定误差,区域适用性分析是合理使用再分析资料的必要前提。本研究选取中国 110 个气象站 1979—2015 年地面观测的风速资料与 ITPCAS 再分析资料中近地面风速数据集进行对比分析。图 2 为 ITPCAS 再分析资料中风速与地面观测数据的日、月、年尺度的 R、ME、RMSE 空间分布。图 3 为日、月、年尺度的 R、ME、RMSE 的分布直方图。表 1 为日、月、年尺度的 R、ME、RMSE 在九大流域范围内的统计结果。经分析,ITPCAS 再分析数据的风速资料在 R 方面表现基本满意。在日尺度上,中国 110 个站点中 90 个站点 R 超过 0.8,15 个站点 R 在 0.6~0.8,5 个站点 $R<0.6$;逐日风速全国平均 R 为 0.826,其中东南诸河流域最低(0.760),松辽河流域最高(0.883)。在月尺度上,

表 1 各流域 ITPCAS 再分析资料与气象站资料误差统计

Tab.1 Statistic results of errors between ITPCAS reanalyzed data and meteorological data

流域分区	R			MEP	RMSE
	逐日	逐月	逐年	/(m·s^{-1})	/(m·s^{-1})
松辽河流域	0.883	0.944	0.875	-0.037	0.586
西北内陆河	0.836	0.927	0.838	-0.032	0.500
海河流域	0.853	0.926	0.805	0.000	0.432
黄河流域	0.795	0.866	0.728	-0.023	0.459
淮河流域	0.829	0.852	0.706	-0.072	0.606
长江流域	0.806	0.862	0.788	-0.035	0.408
西南诸河	0.838	0.908	0.806	-0.010	0.296
东南诸河	0.760	0.702	0.570	0.155	0.625
珠江流域	0.849	0.833	0.776	0.023	0.477
中国平均	0.826	0.878	0.786	-0.016	0.475

110 个站点中 95 个站点 R 超过 0.8,8 个站点 R 在 0.6~0.8,7 个站点 $R<0.6$;逐月风速全国平均 R 为 0.878,其中东南诸河流域最低(0.702),松辽河流域最高(0.944)。在年尺度上,110 个站点中 73 个站点 R 超过 0.8,22 个站点 R 在 0.6~0.8,15 个站点 $R<0.6$;逐年风速全国平均 R 为 0.786,其中东南诸河流域最低(0.570),松辽河流域最高(0.875)。

ITPCAS 再分析数据的逐日风速资料在 ME 方面表现较好,呈南正北负的空间分布特征。其中风速的 ME 在 -0.1~0.1 m·s^{-1} 的站点有 86 个,>0.1 m·s^{-1} 的站点有 9 个,< -0.1 m·s^{-1} 的站点有 15 个。风速 ME 全国平均为 -0.016 m·s^{-1},松辽河流域最低(-0.037 m·s^{-1}),东南诸河最高(0.155 m·s^{-1})。

ITPCAS 再分析数据的逐日风速资料在 RMSE 方面表现较好,分布较为均匀。其中风速的 RMSE<1 m·s^{-1} 的站点有 105 个,>1 m·s^{-1} 的站点有 5 个。风速的 RMSE 全国平均为 0.475 m·s^{-1},西南诸河最低(0.296 m·s^{-1}),东南诸河最高(0.625 m·s^{-1})。

综上所述,ITPCAS 再分析资料的风速数据在中国各区域可较好地代表风速的时间变化周期、趋势及空间分布规律,基本满足应用要求。值得注意的是,东南诸河流域及个别站点再分析资料风速数据的 R 较低和 ME 较大,在全国尺度范围中影响不大,但在较小区域或流域应用时可能需要进一步校正。需要说明的是,再分析数据集是 0.1°分辨率的面平均值,气象站数据为点数据,两者在空间尺度上并不完全重合,存在着海拔、坡度、坡向等差异[22],可能

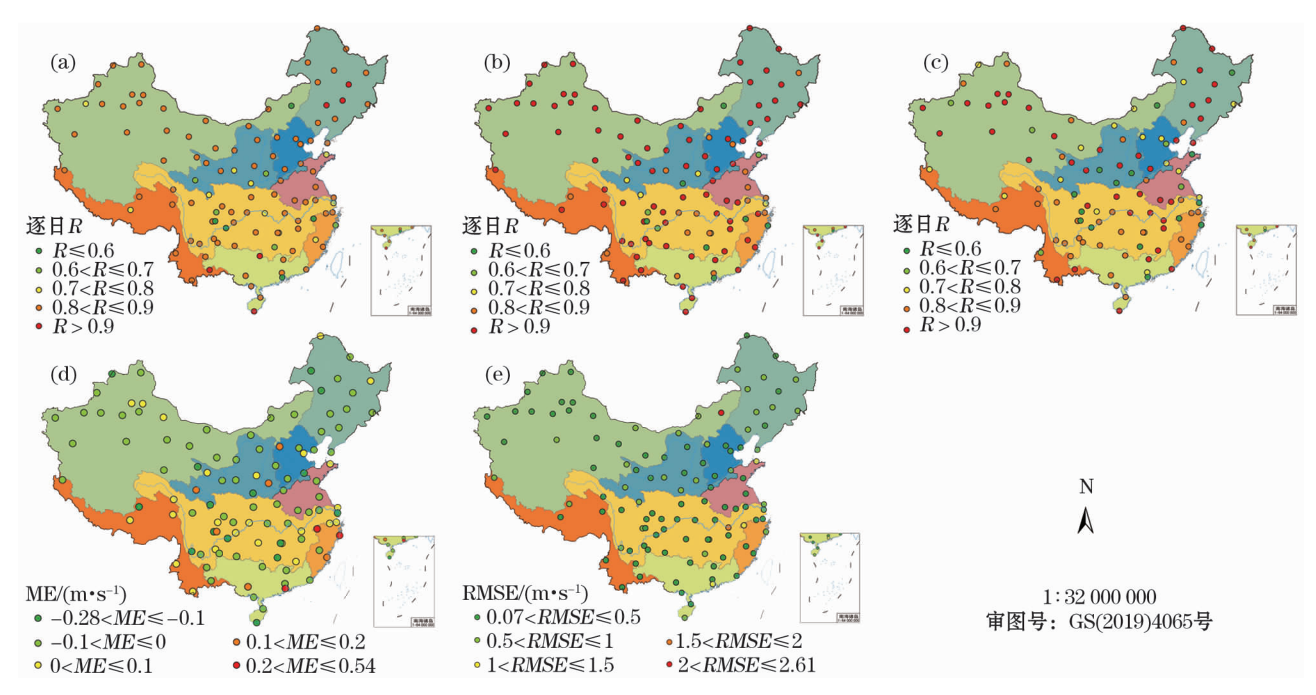


图 2　ITPCAS 再分析资料与气象站资料 R、ME 和 RMSE 的空间分布

Fig. 2　Spatial distributions of R, ME and RMSE between ITPCAS reanalyzed data and meteorological data

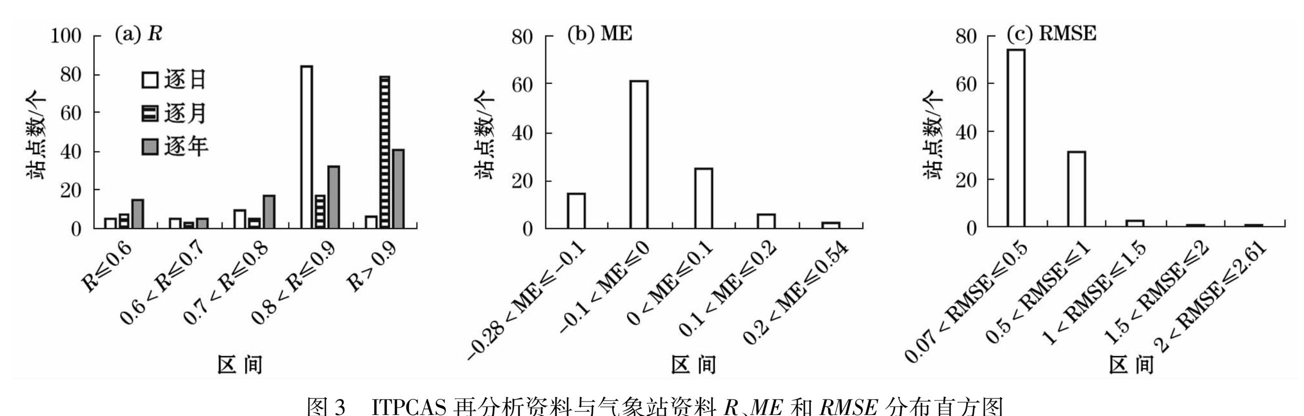


图 3　ITPCAS 再分析资料与气象站资料 R、ME 和 $RMSE$ 分布直方图

Fig. 3　Histograms of R, ME and RMSE between ITPCAS reanalyzed data and meteorological data

造成了一定的统计误差。

2.2　风速资料的修正

从 ITPCAS 再分析资料风速数据集与气象数据比较发现，该数据集在 2011、2012 年中某些站点上 R 尚能接受但 ME 较大，如北京气象站位置，2011、2012 年风速 R 分别为 0.759、0.783，ME 分别为 −0.66、−0.94 $m \cdot s^{-1}$，多年平均 R 为 0.846，ME 为 −0.06 $m \cdot s^{-1}$；淮安气象站位置，2011、2012 年风速 R 分别为 0.781、0.796，ME 分别为 −0.59、−0.98 $m \cdot s^{-1}$，多年平均 R 为 0.832，ME 为 −0.07 $m \cdot s^{-1}$。个别年份和站点的异常值对分析时间变化趋势和空间分布格局影响不大，但在小流域或模型应用上，需对数据进行进一步验证和校准。因此，本研究对 ITPCAS 再分析资料风速数据集 2011、2012 年的风速数据进行再校准。校准原理为对 ITPCAS 再分析资料风速数据集与气象数据的各站 2011、2012 年 ME 做空间插值，插值方法为 IDW 法，得到 2011、2012 年 ME 空间分布，然后叠加到 ITPCAS 的逐日风速数据集上，得到修正后的 ITPCAS 再分析资料风速数据集。

从图 4 可知，2011、2012 年再分析资料风速比气象数据普遍偏小。将这两年数据经过校准修正后，在月尺度和年尺度上 R 均有较大提高，结果见图 5 和表 2。修正后风速数据与气象站资料 R 均有较大幅度提高，在月尺度上 R 平均提升了 4.4%，其中淮河流域 R 提升最大(7.3%)，松辽河流域 R 提升最小(3.1%)；在年尺度上，R 平均提升了11.6%，其中海河流域 R 提升最大(21.2%)，东南诸河流域

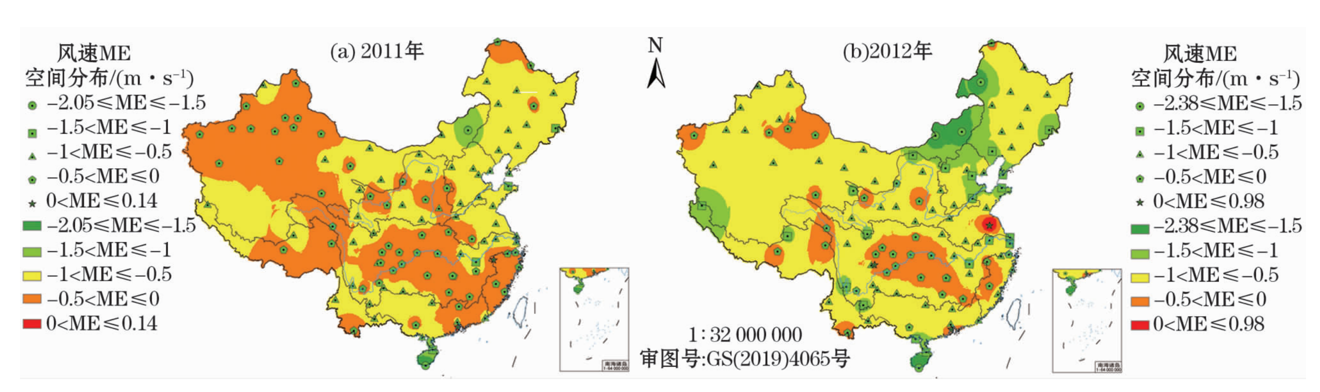


图 4　2011、2012 年风速 ME 插值的空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of interpolated values of wind speed ME in 2011 and 2012

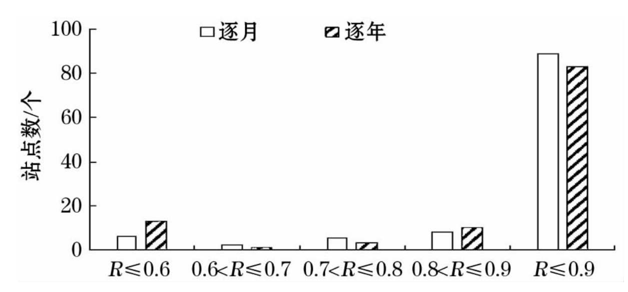


图 5　修正后风速数据与气象站资料 R 的分布直方图

Fig. 5　Histograms of R between modified wind speed data and meteorological data

表 2　各流域修正后风速数据与气象站资料 *R* 的统计

Tab. 2　Statistic results of *R* between modified wind speed data and meteorological data

流域分区	月尺度		年尺度	
	R	修正后提高	R	修正后提高
松辽河流域	0.972	0.029	0.947	0.071
西北内陆河	0.960	0.033	0.950	0.113
海河流域	0.981	0.055	0.975	0.170
黄河流域	0.921	0.055	0.834	0.107
淮河流域	0.914	0.062	0.835	0.129
长江流域	0.893	0.031	0.854	0.067
西南诸河	0.949	0.041	0.913	0.107
东南诸河	0.725	0.023	0.603	0.032
珠江流域	0.883	0.050	0.866	0.090
中国平均	0.916	0.038	0.876	0.091

R 提升最小(5.7%),表明修正后的风速数据在年际变化上具有更好的代表性,在分析中国区域各流域风速时空变化特征时大大降低了误差。另外,修正后的风速数据全国平均 ME 从 $-0.016\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 修正为 $0.020\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$,修正后的风速数据全国平均 RMSE 从 $0.475\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$ 修正为 $0.445\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$。修正后的风速数据模拟精度基本令人满意,相比于站点尺度风速研究,本研究最大的优势在于得到的逐日风速数据集是时空连续的,减少了空间分析的不确定性,特别是在中国西部寒区、旱区等气象站点分布较少的区域作为模型输入数据具有更广泛的应用价值。

2.3　平均风速空间分布和趋势特征

本研究基于 ArcGIS 软件和 IDL 编程得到年平均风速后,进一步得到其多年平均风速的空间分布及风速每 10 a变化速率分布(图6、图7)。图 8 为

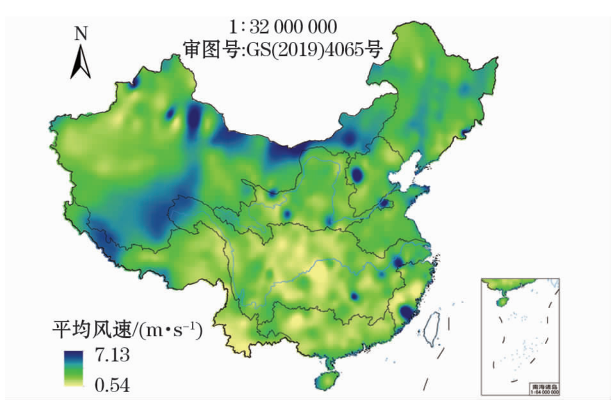


图 6　平均风速空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of mean wind speed

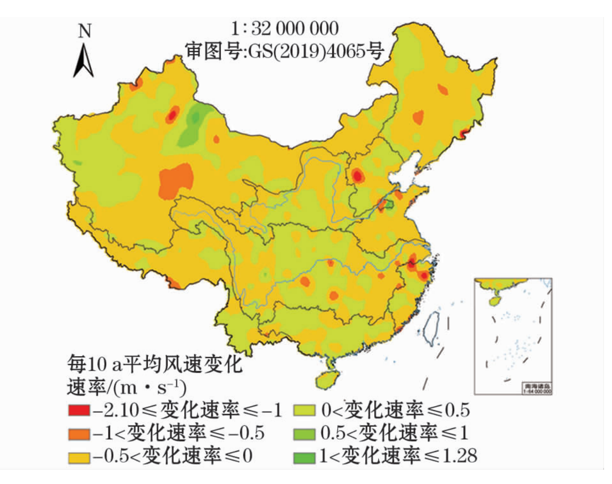


图 7　每 10 a 平均风速变化速率的空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of change rates of mean wind speed every 10 years

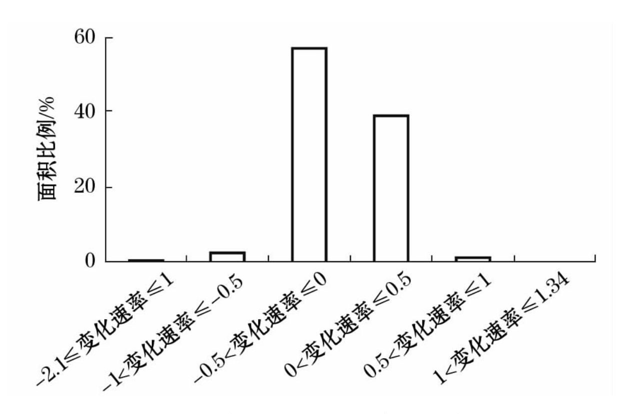


图 8 风速每 10 a 变化速率分布直方图

Fig. 8 Histogram of change rates of wind speed every 10 years

风速每 10 a 变化速率分布直方图，表 3 为各流域多年平均风速及其变化速率统计结果。

经分析，中国多年平均风速为 0.54 ~ 7.10 m · s^{-1}，平均值为 2.47 m · s^{-1}，大体呈西北高、东南低的空间分布格局。风速的空间分布与海拔、地形有较为紧密的联系，在山前迎风坡风速较大。风速较大的区域分布于西部的内蒙古、新疆和西藏等风口区域以及东部山顶地区；风速较小的区域分布于中国中部地区，包括长江中游地区、珠江上中游及云南等地。从流域尺度看，各流域平均风速相差不大，其中西北内陆河流域平均风速最高（2.85 m · s^{-1}），珠江流域平均风速最低（1.86 m · s^{-1}）。1979—2015 年中国 62.12% 的区域风速为下降趋势，37.88% 的区域为上升趋势，上升趋势的区域主要为年平均风速相对较小的区域。绝大部分地区（95.48%）的风速变化在 0.5 m · s^{-1} 以内，除珠江流域外，中国大陆地区各流域风速均处于下降趋势。大陆地区平均每 10 a 风速变化速率为 −0.073 m · s^{-1}，其中东南诸河流域平均每 10 a 变化速率最大（−0.202 m · s^{-1}）；黄河流域平均每 10 a 变化速率最小（−0.030 m · s^{-1}）；珠江流域平均每 10 a 上升速率为 0.036 m · s^{-1}。

表 3 各流域平均风速及其每 10 a 变化速率统计

Tab. 3 Statistic results of mean wind speed and its change rates every 10 years in the drainage basins

流域分区	平均风速 /(m · s^{-1})	每 10 a 风速变化速率 /(m · s^{-1})
松辽河流域	2.68	−0.143
西北内陆河	2.85	−0.070
海河流域	2.45	−0.072
黄河流域	2.29	−0.030
淮河流域	2.50	−0.143
长江流域	1.92	−0.041
西南诸河	2.17	−0.085
东南诸河	2.36	−0.202
珠江流域	1.86	0.036
中国平均	2.47	−0.073

2.4 平均风速年际变化特征

从图 9 可知，1979 年以来中国年平均风速处于振荡下降趋势中，年平均风速最大值（2.80 m · s^{-1}）出现在 1979 年，最小值（2.26 m · s^{-1}）出现在 2011 年。从表 4 可知，中国平均风速在 1981 年附近存在突变；在流域尺度上，1979—2015 年松辽河流域、东南诸河流域不存在突变点，其他各流域均存在突变点，突变年份有所不同。通过趋势检验法分析，除珠江流域外，各流域风速均呈下降趋势；除西北内陆河和黄河流域外，其他流域下降趋势均通过显著水平为 0.01 的检验。在未来一段时间内，风速变化趋势在各个流域将继续保持。

2.5 平均风速年内变化特征

从图10可知，风速年内变化呈单峰形，最大值

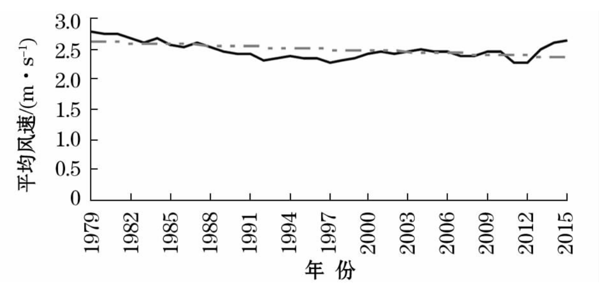


图 9 中国年平均风速的变化

Fig. 9 Change of annual mean wind speed over China

表 4 各流域年平均风速统计值

Tab. 4 Statistic values of annual mean wind speed in the drainage basins

流域分区	突变检验		Mann-Kendall 检验		每 10 a Sen 斜率 /(m · s^{-1})	Hurst 值
	是否存在突变	突变点年份	Z 值	显著性		
松辽河流域	否	–	−5.38	* * *	−0.149	0.967
西北内陆河	是	1980	−1.66	+	−0.058	0.926
海河流域	是	1982	−2.76	* *	−0.063	0.823
黄河流域	是	1980	−1.27		−0.022	0.702
淮河流域	是	2004	−4.28	* * *	−0.138	0.965
长江流域	是	1984	−3.23	* *	−0.056	0.926
西南诸河	是	1998	−4.12	* * *	−0.081	0.897
东南诸河	否	–	−5.72	* * *	−0.221	1.000
珠江流域	是	2009	2.73	* *	0.046	0.866
中国平均	是	1981	−2.68	* *	−0.073	0.920

注：* * * 为通过 $\alpha = 0.001$ 的显著检验，* * 为通过 $\alpha = 0.01$ 的显著检验，* 为通过 $\alpha = 0.05$ 的显著检验，+ 为通过 $\alpha = 0.1$ 的显著检验，– 为无突变年份或未通过显著性检验。下同。

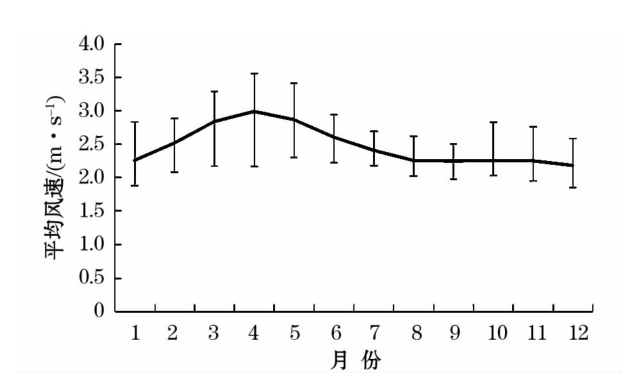


图 10　中国逐月平均风速及最大最小值

Fig. 10　Mean, maximum and minimum values of monthly mean wind speed over China

表 5　各月平均风速统计值

Tab. 5　Statistic values of monthly mean wind speed

月份	突变检验		Mann-Kendall 检验		10 a Sen 斜率 /(m·s^{-1})	Hurst 值
	是否存在突变	突变点年份	Z 值	显著性		
1	是	1980	-1.61	-	-0.049	0.845
2	是	1984	-1.74	+	-0.062	0.857
3	是	1987	-3.81	* * *	-0.115	0.837
4	是	1988	-4.25	* * *	-0.139	0.772
5	是	1984	-3.49	* * *	-0.121	0.888
6	是	1985	-3.62	* * *	-0.102	0.992
7	是	1984	-1.84	+	-0.046	0.869
8	是	1980	-0.77	-	-0.017	0.961
9	是	1981	-1.06	-	-0.029	0.916
10	是	1985	-1.56	-	-0.046	0.894
11	是	1981	-1.35	-	-0.043	0.849
12	否	-	1.27	-	0.043	0.988

(2.99 m·s^{-1})出现在 4 月,最小值(2.18 m·s^{-1})出现在 12 月。从正负误差线可以看出,多年来中国区域各月风速变化幅度最大的月份出现在 4 月,最大、最小值相差 1.40 m·s^{-1},变化幅度最小的月份是 12 月,最大、最小值相差 0.73 m·s^{-1}。

从表 5 可知,中国大陆区域除 12 月外,其他各月份风速均存在突变,突变年份在 1980—1988 年;除了 12 月风速增加外,其他各月风速均呈下降趋势,仅 3—6 月(春季)风速的下降趋势通过显著水平为 0.05 的检验;3—6 月风速下降速率最大,对年平均风速下降贡献最大。在未来的一段时间中国大陆区域将保持风速下降的趋势。

3　结 论

(1) ITPCAS 再分析数据集风速在中国区域表现出较好的观测精度,基本满足应用要求。但在 2011、2012 年再分析数据集风速普遍偏小,修正后风速数据集模拟精度得到较大提高。修正后的风速数据在空间分布上具有更大优势,在年际变化趋势上具有更好的代表性,特别是弥补了西部高寒、干旱地区观测台站不足的问题,在该区域及流域气候变化、水文循环模拟分析和应用中具有较好的前景。

(2) 中国多年平均风速为 0.54 ~ 7.10 m·s^{-1},平均值为 2.47 m·s^{-1},大体呈西北高、东南低的空间格局。从流域尺度上,西北内陆河流域平均风速最高,珠江流域平均风速最低。1979—2015 年中国大部分区域风速为下降趋势,全国平均风速每 10 a 变化速率为 -0.073 m·s^{-1}。

(3) 除珠江流域外,其他各流域风速均呈下降趋势。中国各月平均风速年内变化呈单峰形,最大值与最小值分别出现在 4 月和 12 月。年平均风速的下降主要表现为 3—6 月下降速率最大。在未来的一段时间内中国大陆将保持风速下降的趋势。

近 37 a 来,中国大部分区域风速呈下降趋势的原因,可能是区域气温升高导致大陆与海洋气压差减小,从而使得季风减弱;另外,中国北方地区大量的退耕还林、植树造林等活动,也可能导致近地面风速降低。当然,风速变化受多因素综合影响,这也是下一步研究的重点方向。

参考文献(References):

〔1〕 李爽,王羊,李双成. 中国近 30 年气候要素时空变化特征〔J〕. 地理研究,2009,28(6):1 593 -1 605.〔Li Shuang, Wang Yang, Li Shuangcheng. Spatio-temporal patterns of climatic change in China in recent 30 years〔J〕. Geographical Research, 2009, 28(6): 1 593 -1 605.〕

〔2〕 Diffenbaugh N S, Fifld C B. Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions〔J〕. Science, 2013, 341(6 145): 486 - 492.

〔3〕 Hansen J, Sato M, Ruedy R. Perception of climate change〔J〕. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(37): 2 415 -2 423.

〔4〕 O' Gorman P A, Schneider T. The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change〔J〕. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(35): 14 773 -14 777.

〔5〕 王遵娅,丁一汇,何金海,等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析〔J〕. 气象学报,2004,62(2):228 -236.〔Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years〔J〕. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(2): 228 -236.〕

〔6〕 史培军,张钢锋,孔峰,等. 中国 1961—2012 年风速变化区划〔J〕. 气候变化研究进展,2015,11(6):387 – 394.〔Shi Peijun, Zhang Gangfeng, Kong Feng, et al. Wind speed change regionalization in China in 1961 – 2012〔J〕. Climate Change Research, 2015, 11(6):387 – 394.〕

〔7〕 熊敏诠. 近 30 年中国地面风速分区及气候特征〔J〕. 高原气象,2015,34(1):39 – 49.〔Xiong Minquan. Climate regionalization and characteristics of surface wind over China in recent 30 years〔J〕. Plateau Meteorology, 2015, 34(1):39 – 49.〕

〔8〕 汪步惟,张雪芹. 1971—2014 年青藏高原参考蒸散变化及其归因〔J〕. 干旱区研究,2019,36(2):269 – 279.〔Wang Buwei, Zhang Xueqin. Change and attribution of reference evapotranspiration over the Tibetan Plateau during the period of 1971 – 2014〔J〕. Arid Zone Research, 2019, 36(2):269 – 279.〕

〔9〕 曹静,阿拉木萨. 科尔沁沙地西部蒸发皿蒸发量变化及其影响因子分析〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):418 – 424.〔Cao Jing, Aramusa. Variation of pan evaporation and its affecting factors in the west Horqin Sandy Land〔J〕. Arid Zone Research, 2018, 35(2):418 – 424.〕

〔10〕 于文金,吴雁,黄亦露,等. 河北省雾霾波动变化特征及成因研究〔J〕. 大气科学学报,2016,34(4):554 – 561.〔Yu Wenjin, Wu Yan, Huang Yilu, et al. Study on the characteristics and causes of the change of haze in Hebei〔J〕. Journal of Atmospheric Science, 2016, 34(4):554 – 561.〕

〔11〕 吴萍,丁一汇,柳艳菊,等. 中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系〔J〕. 气象学报,2016,46(3):352 – 366.〔Wu Ping, Ding Yihui, Liu Yanju, et al. The formation of east-central China winter haze and relations with East Asia winter monsoon and atmospheric humidity〔J〕. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 46(3):352 – 366.〕

〔12〕 孔峰,王一飞,方佳毅,等. 1957—2015 年中国低能见度日数时空变化特征〔J〕. 干旱区研究,2017,34(6):1 203 – 1 213.〔Kong Feng, Wang Yifei, Fang Jiayi, et al. Spatio-temporal variation of the days of low visibility in China during the period from 1957 to 2015〔J〕. Arid Zone Research, 2017, 34(6):1 203 – 1 213.〕

〔13〕 Song L C, Gao R, Li Y, et al. Analysis of China's haze days in the winter half year and the climatic background during 1961 – 2012〔J〕. Advances in Climate Change Research, 2014, 5(5):1 – 6.

〔14〕 王存忠,牛生杰,王兰宁. 50 年来中国沙尘暴的多时间尺度变化特征〔J〕. 大气科学学报,2009,32(4):507 – 512.〔Wang Cunzhong, Niu Shengjie, Wang Lanning. Multi-timescale variation of sand-dust storm in China during 1958 – 2007〔J〕. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, 32(4):507 – 512.〕

〔15〕 Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, et al. Northern hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness〔J〕. Nature Geoscience, 2010, 3(11):756 – 761.

〔16〕 McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, et al. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation〔J〕. Journal of Hydrology, 2012, 416(3):182 – 205.

〔17〕 McVicar T R, Niel T G V, Li L T, et al. Wind speed climatology and trends for Australia, 1975 – 2006: Capturing the stilling phenomenon and comparison with near-surface reanalysis output〔J〕. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20):288 – 299.

〔18〕 Pryor S C, Barthelmie R J, Riley E S. Historical evolution of wind climates in the USA〔J〕. Journal of Physics: Conference Series, 2007. http://doi:10.1088/1742 – 6596175/1/012065.

〔19〕 Wan H, Wang X L, Swail V R. Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds〔J〕. Journal of Climate, 2010, 23(5):1 209 – 1 225.

〔20〕 Pirazzoli P A, Tomasin A. Recent near-surface wind changes in the central Mediterranean and Adriatic areas〔J〕. International Journal of Climatology, 2003, 23(8):963 – 973.

〔21〕 Jiang Y, Luo Y, Zhao Z. Maximum wind speed changes over China〔J〕. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 27(1):63 – 74.

〔22〕 赵佳莹,徐海明. 中国区域探空资料与再分析资料风速场的对比分析〔J〕. 气候与环境研究,2014,19(5):587 – 600.〔Zhao Jiaying, Xu Haiming. Comparison of wind velocity among reanalysis and radiosonde datasets over China〔J〕. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(5):587 – 600.〕

〔23〕 任国玉,郭军,徐铭志,等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征〔J〕. 气象学报,2005,63(6):942 – 956.〔Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century〔J〕. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6):942 – 956.〕

〔24〕 荣艳淑,梁嘉颖. 华北地区风速变化的分析〔J〕. 气象科学,2008,28(6):655 – 658.〔Rong Yanshu, Liang Jiaying. Analysis of variation of wind speed over North China〔J〕. Scientia Meteorologica Sinica, 2008, 28(6):655 – 658.〕

〔25〕 张志斌,杨莹,张小平,等. 我国西南地区风速变化及其影响因素〔J〕. 生态学报,2014,34(2):471 – 481.〔Zhang Zhibin, Yang Ying, Zhang Xiaoping, et al. Wind speed changes and its influencing factors in Southwestern China〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2):471 – 481.〕

〔26〕 曾淑玲,程一帆,王式功,等. 我国西北和内蒙古地区春季沙尘暴的年代际变化及原因探析〔J〕. 中国沙漠,2010,30(5):1 200 – 1 206.〔Zeng Shuling, Cheng Yifan, Wang Shigong, et al. Decadal change of spring sand dust storm in Northwest and Inner Mongolia of China and its cause〔J〕. Journal of Desert Research, 2010, 30(5):1 200 – 1 206.〕

〔27〕 任国玉,战云健,任玉玉,等. 中国大陆降水时空变异规律. I:气候学特征〔J〕. 水科学进展,2015,26(3):299 – 310.〔Ren Guoyu, Zhan Yunjian, Ren Yuyu, et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China. I: Climatology〔J〕. Advances in Water Science, 2015, 26(3):299 – 310.〕

〔28〕 张晓龙,沈冰,黄领梅,等. 基于多源数据集估算缺资料地区地表净辐射及其时空变化特征〔J〕. 西安理工大学学报,2018,34(4):379 – 387.〔Zhang Xiaolong, Shen Bing, Huang Lingmei, et al. Estimation of surface net radiation and its temporal and spatial

variations in ungauged region based on multi-source data sets〔J〕. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(4): 379 - 387.〕

〔29〕张晓龙,韩颖,黄领梅,等. 降水变化及人类活动对金钱河流域径流的影响〔J〕. 水资源与水工程学报,2015,26(4):11 - 14.〔Zhang Xiaolong, Han Ying, Huang Lingmei, et al. Impact of precipitation change and human activity on runoff in Jinqian river basin〔J〕. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(4): 11 - 14.〕

〔30〕张晓伟,沈冰,孟彩侠. 和田绿洲水文气象要素分形特征与 R/S 分析〔J〕. 中国农业气象,2008,29(1):12 - 15.〔Zhang Xiaowei, Shen Bing, Meng Caixia. Fractal characteristics and R/S analysis of hydrometeor in Hotian Oasis of Xinjiang Autonomous Region〔J〕. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(1): 12 - 15.〕

Spatiotemporal Variation of Near Surface Wind Speed over China Based on ITPCAS Reanalyzed Dataset

ZHANG Xiao-long, SHEN Bing, HUANG Ling-mei

(*State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *Shaanxi, China*)

Abstract: Accurate analysis of spatiotemporal variation of near surface wind speed is critical for climate change, evaporation estimation and fog forecast, etc. Using the data of daily near surface wind speed (10 m in height) products provided by ITPCAS reanalyzed dataset from 1979 to 2015 and the daily wind speed data from 110 meteorological stations over China, the applicability of this dataset was analyzed. The wind speed data during the period of 2011 - 2012 were modified. The spatiotemporal variation of modified wind speed data was analyzed. The results showed that: ① The ITPCAS reanalyzed dataset could basically meet the application requirements, but partial data needed to be modified. The accuracy of the modified wind speed data was greatly improved, which performed satisfactorily, particularly in cold and arid regions of northwest China. There was a good application prospect of the modified wind speed data; ② Wind speed decreased visibly in 62.12% regions of China during 1979 - 2015, and the decrease rate of the annual mean wind speed was $-0.073\ m\cdot s^{-1}$ every 10 years over China, in which the highest decrease rate ($-0.202\ m\cdot s^{-1}$) occurred in the drainage basins in the southeastern; ③ Wind speed in other drainage basins was in a decrease trend except that in the Zhujiang River Basin. The curve of monthly average wind speed over China was unimodal, and the maximum and minimum values appeared in April and December respectively; ④ Decrease of wind speed over China was the most significant from March to June. The change trend of monthly wind speed in the future would maintain in the drainage basins.

Key words: near surface wind speed; ITPCAS reanalyzed dataset; spatiotemporal variation; applicability analysis; China